DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160577

贾旭, 高永, 齐呼格金, 魏宝成, 崔向新, 蒙仲举, 唐国栋. 基于MODIS数据的内蒙古野火时空变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 127−135
Jia X, Gao Y, Qi H G J, Wei B C, Cui X X, Meng Z J, Tang G D. MODIS-based spatio-temporal distribution of wildfire in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 127−135

基于MODIS数据的内蒙古野火时空变化特征*

贾 旭[1], 高 永[1**], 齐呼格金[2], 魏宝成[3], 崔向新[1], 蒙仲举[1], 唐国栋[1]

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古林业厅防火指挥办公室 呼和浩特 010020; 3. 兰州大学资源环境学院 兰州 730000)

摘 要: 野火是陆地生态系统的重要干扰因子, 影响生态系统的演替和更新。研究基于MCD45A1火烧迹地和MCD12Q1土地利用数据, 提取2002—2014年内蒙古不同生态分区、土地利用类型的过火面积及火点分布, 分析该区域野火的时空分布格局, 同时结合降水数据, 探讨野火年际变化对降水的响应特性。结果表明: 1)2002—2014年内蒙古野火火点空间分布格局表现为由东北向西南逐渐减少, 高密度火点主要分布在中蒙边境区域、森林-草原区以及平原典型农耕区。2)内蒙古野火过火面积2003年最大, 2006年次之, 2010年最小, 分析表明过火面积的年际变动与火灾高发月降水异常有关。过火面积的季节变化表现为春秋多, 冬夏少, 尤其是3月、4月、5月和9月灾情严重。在7大生态分区中, 90%的过火面积集中在兴安岭山地丘陵区、呼伦贝尔高平原丘陵区和锡林郭勒高平原区, 过火面积占比分别为52%、28%和10%。3)野火干扰最严重的土地利用类型为草地, 火点主要集中分布于草甸草原和典型草原, 其次为农业用地和林地, 对其他类型干扰程度最小。充分认识野火时空分布格局有利于深入了解其发生规律, 为区域火灾预警监测提供科学依据。

关键词: 野火; 时空分布; MODIS; 内蒙古; 生态分区; 土地利用
中图分类号: X43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)01-0127-09

MODIS-based spatio-temporal distribution of wildfire in Inner Mongolia*

JIA Xu[1], GAO Yong[1**], QI Hugejin[2], WEI Baocheng[3], CUI Xiangxin[1], MENG Zhongju[1], TANG Guodong[1]

(1. College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Fir Control Office of Forestry Administration in Inner Mongolia, Hohhot 010020, China; 3. College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Wildfire is a key disturbance factor in terrestrial ecosystems that greatly influences not only ecosystem patterns and processes, but also maintaining of diversity, productivity and nutrient cycling throughout global ecosystems. Fire is the result of interaction between natural and anthropogenic factors. The determination of the spatial and temporal distribution characteristics of the fire regimes is critical for predicting the response of fire to climate change and designing strategic fire management plans. Inner Mongolia is an ideal area for studying the distribution patterns of wildfire because of its strategic location, high ecological value and severe wildfire hazards. Inner Mongolia endures severe wildfires, and the area burned by fire in the province is one of the highest among all the provinces in China. Here, we analyzed the spatial and temporal distribution patterns of burned areas and fire spots in Inner Mongolia using MCD45A1 burned areas (a monthly Level-3 gridded 500 meter fire burned area product) and MCD12Q1 (Land Cover Type Yearly L3 Global 500 m SIN Grid) land use

* 内蒙古自治区林业厅"森林灾害风险区划及评估"项目资助
** 通讯作者: 高永, 研究方向为荒漠化防治。E-mail: 13948815709@163.com
贾旭, 研究方向为自然灾害监测与防治。E-mail: jx84711230@126.com
收稿日期: 2016-06-29 接受日期: 2016-09-08

* Supported by the Program of Inner Mongolia Autonomous Region Forestry Administration "Risk Assessment and Division of Forest Disaster"
** Corresponding author, E-mail: 13948815709@163.com
Received Jun. 29, 2016; accepted Sep. 8, 2016

data for the period 2002–2014. Through the integration of precipitation data, the impact of precipitation on the characteristics of annual variations in wildfire was investigated. The results showed that: 1) the spatial distribution of fire spots gradually decreased from northeast to southwest and the high density areas were mainly distributed in the border region between China and Mongolia, the forest-grassland belt and typical arable zones. 2) The largest wildfire area in Inner Mongolia was in 2003, followed by 2006, and the smallest was in 2010. Analysis showed that the interannual change of burning area was closely linked to fire high-risk monthly precipitation anomaly. The happening of fire showed seasonal variations, which autumn and spring was high-incidence season, especially the months of March, April, May and September. The fire-burned areas in Xing'anling mountainous and hilly region, Hulunbuir plateau and hilly region, and Xilingol Plateau accounted for 90% of the total burned areas in the seven ecological zones of Inner Mongolia, with area ratios of 52%, 28% and 10%, respectively. 3) The fire-burned areas ranked from large to small was in the sequence of pasture land, agriculture land, woodland and other land use types in the study area. Fire spots were mainly distributed in meadow steppe and typical steppe zones. A large proportion of the fire enhanced recovery of old pastures overtaken by invasive species and secondary growth. This form of pasture management in Inner Mongolia was an important cause of wildfires in pasture lands. The practice of burning straw every spring and autumn also intensified the distribution of fire in typical arable lands, especially in the Nenjiangxian Plain, Hetao Plain and Songnen Plain. The fire-burned area in Xing'anling mountainous and hilly region and Hulunbuir plateau and hilly region had the same variation trend. The results were critically helpful in understanding the spatial and temporal patterns of wildfire and provided scientific basis for wildfire monitoring and alert system.

Keywords: Wildfire; Spatial and temporal distribution; MODIS; Inner Mongolia; Ecological zone; Land use type

野火是指一切发生在自然生态系统中的火[1]，它主要通过自然与人为因素共同作用来干扰植物群落结构、动物生存繁殖。野火在燃烧的过程中不仅能够改变土壤化学性质，还会影响大气中温室气体和气溶胶的含量。温室气体尤其是 CO_2 浓度升高易导致植物气孔关闭，树冠蒸发减弱。气溶胶的增加，则会减少抵达地表的大气辐射量，地球表层接收的太阳光线因此减弱，其中黑炭气溶胶的增加，还会导致太阳光对黑炭的加热作用加剧，减少天空中的云量，从而减少降雨[2]。目前影响火灾发生的因素主要有持续高温、雷电大风以及人为扰动等，具体表现在持续高温使得表层土壤湿度和植物体内含水量迅速减少，地表可燃物不断积累，为火灾发生提供了物质基础；雷电是诱发森林火灾的重要自然因子；大风可引发火灾方向、速度的突变；人为因素主要体现在土地利用与管理方式、路网密度、放牧强度及景观破碎度等方面。

最初人们对火灾的时空分布规律多利用火灾历史记录数据结合数理统计方法进行分析[3-5]。Seol 等[6]基于 1991—2005 年韩国火灾发生次数、过火面积数据，利用聚类分析和主成分分析探究森林火灾季节变化特征。王明玉等[7]利用美国加利福尼亚州及中国黑龙江省的林火统计数据，计算每年火场质心的经纬度，结合波谱分析探讨了林火质心随时间的波动现象。苏立娟等[8]根据年鉴数据，借助聚类分析、主成分分析及信息扩散理论探讨中国 1950— 2010 年森林火灾时空分布格局及风险状况。随着遥感技术的应用与发展，特别是具有高空间、时间分辨率传感器的成功发射，使得众多学者将目光从火灾统计数据转向利用多种遥感数据来源对火灾长时间序列的监测。目前对于火灾的遥感监测手段较多，主要包括环境卫星[9-10]、MODIS[11-13]及 NOAA 系列[14-15]等不同监测目的的遥感数据。Aragão 等[16-17]利用 NOAA-12 数据集提取巴西亚马逊流域的火烧迹地，分析降水量、森林砍伐对火灾的响应特征。Araújo 等[18]利用 MCD45A1 及 TRMM 降雨数据集，探讨巴西不同生态分区上的过火面积时空分布格局及影响因子，认为拉尼娜现象引发的降水异常是巴西野火过火面积年际动态变化的主要原因。何诚等[19]基于 MOD14A1 火点及 MCD45A1 火烧迹地数据，探究黑龙江省森林火险的空间分布规律。邓欧等[20]采用 MCD45A1 数据，结合气候因子、地物类型、地形因子及人类活动等森林火险影响因子，建立基于空间 Logistic 的黑龙江省林火风险模型与火险区划。

内蒙古位于中国北部边疆，是我国北方重要的天然生态屏障。该区域森林、草地覆盖面积大、分布连续，易燃物储量多，火灾风险高。但对于该区域的野火分布格局及其在自然生态系统中的作用研究较少。因此，本文基于 MCD45A1 火烧迹地和 MCD12Q1 土地利用数据，提取 2002—2014 年内蒙古七大生态分区及不同土地利用类型的过火面积及火点分布，分析了内蒙古野火的时空分布特征，为该区域火灾预警监测、重点防治及防灾减灾工作提供科学依据。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

内蒙古自治区地处中国北部边疆，介于 37°24′~

53°23′N, 97°12′~126°04′E。北部与蒙古国接壤，东部与黑龙江、吉林毗邻，西部为甘肃，南部为宁夏、山西、陕西、河北、辽宁。全区土地总面积为 118.3 万 km^2，其中东西直线距离 2 400 km，南北跨度 1 700 km，总人口 2 498 万。地貌类型以高平原为主，地势西高东低，海拔高度 900~1 300 m。气候类型属典型的温带大陆性气候，冬季寒冷漫长、夏季炎热干燥。年降水量 50~450 mm，降水区域分布不均匀，东部多西部少，且降水主要集中在夏季。根据第 7 次森林资源清查结果显示，内蒙古林地面积为 4 389.89 万 hm^2，其中森林面积为 2 487.90 hm^2，位居全国首位。植被覆盖类型由东北向西南依次为森林→森林草原→草甸草原→典型草原→荒漠草原→草原化荒漠，森林植被主要分布在大兴安岭、阴山山脉、贺兰山等山区，主要树种有落叶松(*Larix gmelinii*)、云杉(*Picea asperata*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、榆树(*Ulmus pumila*)等。

1.2　数据源

选取搭载于 Terra 和 Aqua 卫星上由 MODIS 传感器获取的 2002—2014 年覆盖整个内蒙古的 MCD45A1(a monthly Level-3 gridded 500 meter fire burned area product)火烧迹地产品数据。该产品由 NASA 网站提供(http://ladsweb.nascom.nasa.gov)，数据格式为 HDF，投影类型为 Sinusoidal，整个研究区由 7 景影像覆盖，用来提取过火像元和着火日期信息。

采用 Landsat 系列卫星遥感影像数据，可由美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)网站下载(http://glovis.usgs.gov)。Landsat 数据投影类型为 UTM 投影，带号为 48，椭球体基准为 WGS-84。对 Landsat 数据目视解译提取 3 场草原火灾和 1 场森林火灾的过火面积，验证由 MCD45A1 火烧迹地产品提取的过火面积，具体的火场及验证影像信息见表 1。

表 1　单场火火场及验证影像信息
Table 1　Verification information of fire and landsat images

起火时间(年-月-日) Fire Time (year-month-day)	起火地点 Fire Place	火灾类型 Fire type	影像选取时间(年-月-日) Image selection time (year-month-day)	数据源 Data source	分辨率 Resolution (m)
2005-10-16	东乌珠穆沁旗 Dong Ujimqin Banner	草原火灾 Grassland fire	2005-10-22	TM	30
2006-05-25	呼伦贝尔市免渡河镇 Hulunbuir, Mianduhe Town	森林火灾 Forest fire	2006-06-03	TM	30
2012-04-19	陈巴尔虎旗温都尔嘎查 Chenbarag Banner, Wendu’er Village	草原火灾 Grassland fire	2012-05-01	ETM+	30
2014-04-01	西乌珠穆沁旗巴彦华镇 Xi Ujimqin Banner, Bayanhua Town	草原火灾 Grassland fire	2014-04-05	ETM+	30

2005 年内蒙古土地利用数据采自搭载于 Terra 和 Aqua 卫星上的 MCD12Q1(Land Cover Type Yearly L3 Global 500 m SIN Grid)产品数据，同时采用国际地圈生物圈计划(International Geosphere Biosphere Programme, IGBP)的土地覆盖分类体系。根据本文的研究目的，将 IGBP 计划中的 19 大地类合并为林地、草地、农业用地及其他类型 4 类。

内蒙古生态分区采用《中国草地资源区划图》中的分区方法[21]，将内蒙古划分为兴安岭山地丘陵区、阿拉善高平原区、乌兰察布高平原区、呼伦贝尔高平原丘陵区、辽河平原沙地区、锡林郭勒高平原区、鄂尔多斯高平原区七大生态区(图 1)。

在中国气象数据网(http://data.cma.cn)下载 2002—2012 年内蒙古 48 个气象站点的月降水量数据，探究野火年际变化对降水的响应特性。

1.3　研究方法

利用 MRT 转换工具做批量图幅拼接及投影转换，将原有的 Sinusoidal 投影坐标转换为适合中国地区的兰伯特投影。利用 ENVI/IDL 软件进行裁剪

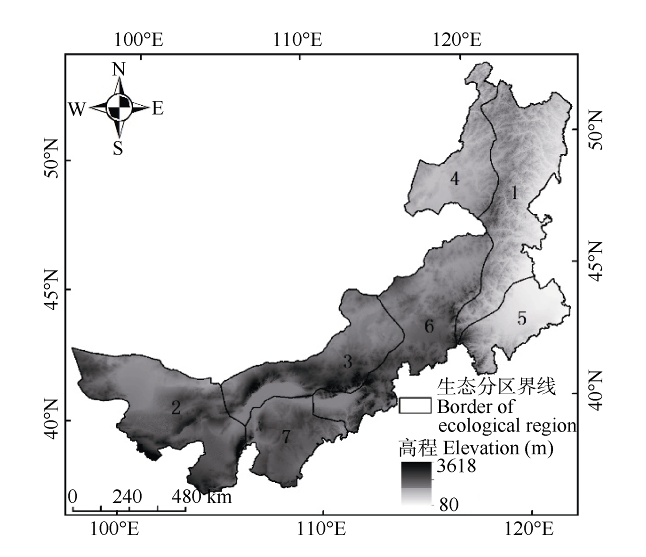


图 1　内蒙古七大生态分区分布
Fig. 1　Spatial distribution of seven ecological regions in the Inner Mongolia

1：兴安岭山地丘陵区；2：阿拉善高平原区；3：乌兰察布高平原区；4：呼伦贝尔高平原丘陵区；5：辽河平原沙地区；6：锡林郭勒高平原区；7：鄂尔多斯高平原区。1: Xing’anling mountainous and hilly region; 2: Alxa Plateau; 3: Ulanqab Plateau; 4: Hulunbuir plateau and hilly region; 5: Liaohe River plain and sandy region; 6: Xilingol Plateau; 7: Erdos Plateau.

并提取 MCD45A1 中 burntdata.HDF 数据。Burntdata 包含过火像元及着火日期，其中着火日期采用儒略日表示，着火像元各属性值对应内容如表 2 所示。将过火像元与内蒙古生态分区及土地利用类型图叠加，提取 2002—2014 年内蒙古不同生态分区和土地利用类型的过火像元。

表 2 MCD45A1 数据集属性值含义

Table 2 Specific contents of MCD45A1 database

属性值 Attribute value	对应具体内容 Content
0	未燃烧区域 Unburned area
1~366	燃烧日期 Approximate Julian day of burning
900	雪或高气溶胶区域 Snow or high aerosol area
9 998	内陆水体 Inland water bodies
9 999	海洋水体 Sea water bodies
10 000	数据缺失区域 Area without enough data to perform inversion throughout the period

采用降水量异常值来分析野火年际变化对降水的影响。降水异常值的计算采用 Armenteras-Pascual 等[22]的方法，其计算公式如下：

$$A=\frac{\mathrm{PPT}_i-\overline{X}}{\mathrm{SD}} \tag{1}$$

式中：i 为年份，A 为降水量异常值；PPT_i 为第 i 年火灾高发月(3 月、4 月、5 月、9 月)的降水量，$\overline{X}$ 为 2002—2012 年降水平均值，SD 为降水量标准差。如果 A 为正值，则表示该年火灾高发月的降水量高于多年平均值；A 为负值，则表示该年火灾高发月的降水量低于多年平均值。计算过程为：首先计算每个像元上的火灾高发月总降水量的均值、标准差，然后获得每个生态分区降水异常值的平均值，从而得到 2002—2012 年内蒙古七大生态分区的降水异常值。

2 结果与分析

2.1 数据精度验证

由 Landsat 数据和 MCD45A1 火产品提取的 3 次草原火灾和 1 次森林火灾的过火面积分别为 244 km^2、37 km^2、184 km^2、342 km^2 和 222 km^2、32 km^2、146 km^2、266 km^2，其误差率为 9%、14%、21%和 22%。MCD45A1 火产品提取的过火面积与 TM 影像提取的单场火过火面积接近。因此，MCD45A1 数据产品可以作为大范围火灾灾情监测的重要手段。同时，MCD45A1 数据集对草原火灾的监测精度高于森林火灾。产生这一现象的原因可能是：①林地发生地表火时，上层植被的遮挡导致传感器难以探测到地表火的发生。②林地内空气流通不畅，着火时产生的烟雾很难快速扩散，从而影响传感器对过火迹地的监测精度[18]。

2.2 内蒙古野火时空分布

2.2.1 空间分布特征

图 2 表明，野火火点总的空间分布格局表现为由东北向西南逐渐减少，局部地区火点较为密集，高密度火点主要分布在以下 3 个区域：①中蒙边境区域：自锡林郭勒盟阿巴嘎旗北部起，沿中蒙边境线向东横穿锡林郭勒草原，一直延伸至呼伦贝尔草原东南端；自呼伦贝尔草原西部起，向东北方向延伸至额尔古纳河流域区域。②森林—草原区域：主要分布在大兴安岭寒温带/温带针叶/阔叶林、大兴安岭西麓森林向呼伦贝尔草原过渡的森林—草原区以及锡林郭勒东部典型草原区。③平原典型农耕区域：主要分布在大兴安岭东侧的嫩江西岸平原、松嫩平原西缘及河套—土默川平原的典型农耕区。

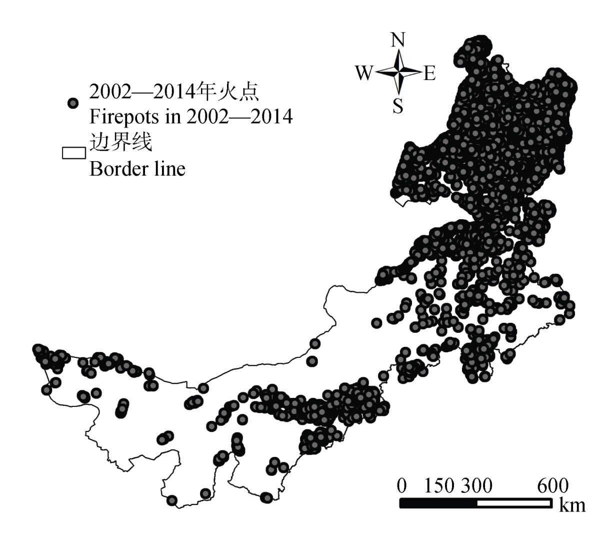


图 2 2002—2014 年内蒙古不同生态分区野火火点空间分布

Fig. 2 Distribution of wildfire hotspots in Inner Mongolia from 2002 to 2014

2.2.2 时间分布特征

图 3 表明，2003 年内蒙古野火过火总面积为 1.46 万 km^2，是整个研究时段过火面积最大的年份。2014 年、2006 年次之，其过火面积分别为 0.58 万 km^2、0.55 万 km^2。2010 年野火过火面积为 0.08 万 km^2，是整个研究时段火灾灾情最轻的年份。内蒙古 90%的野火过火面积集中于兴安岭山地丘陵区、呼伦贝尔高平原丘陵区、锡林郭勒高平原区，过火面积分别占整个区域过火面积的 52%、28%、10%，其余 4 个生态区的野火过火面积均小于 5%。野火过火面积年际波动明显的生态区主要分布在兴安岭山地丘陵区、呼伦贝尔高平原丘陵区及锡林郭勒高平原区，且兴安岭山地丘陵区与呼伦贝尔高平原丘陵区

野火过火面积的变化趋势基本一致，尤其是 2003 年和 2006 年，上述两个生态区的过火面积之和占研究时段总过火面积的 34%和 11%，其余年份均小于 7%。锡林郭勒高平原区在 2003 年和 2006 年过火面积变动不大。其余 4 个生态区过火面积年际波动不明显。

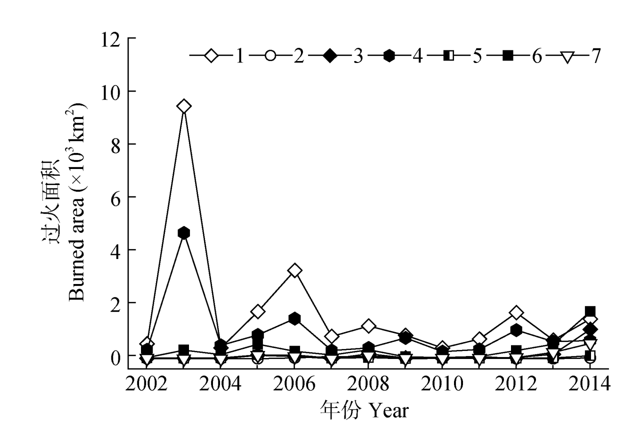


图 3　2002—2014 年内蒙古不同生态分区野火过火面积的年际变化特征

Fig. 3　Annual variation of burned area over seven ecological regions in Inner Mongolia from 2002 to 2014

1: 兴安岭山地丘陵区; 2: 阿拉善高平原区; 3: 乌兰察布高平原区; 4: 呼伦贝尔高平原丘陵区; 5: 辽河平原沙地区; 6: 锡林郭勒高平原区; 7: 鄂尔多斯高平原区。1: Xing'anling mountainous and hilly region; 2: Alxa Plateau; 3: Ulanqab Plateau; 4: Hulunbuir plateau and hilly region; 5: Liaohe River plain and sandy region; 6: Xilingol Plateau; 7: Erdos Plateau.

气候变化是影响火灾强度和蔓延速度的重要因素[23-24]。图 4 显示 2002—2012 年内蒙古不同生态分区的降水异常值。兴安岭山地丘陵区与呼伦贝尔高平原丘陵区的降水异常值变化趋势基本一致，这两个生态区在 2003 年、2006 年的降水量均低于前一年及 2002—2012 年的多年平均降水量。兴安岭山地丘陵区在 2003 年降水量比 2002 年少 2 mm，低于平均值 1.02 mm。2006 年降水量比 2005 年少 64 mm，低于平均值 1.53 mm，是降水最异常的年份。呼伦贝尔高平原区在 2003 年降水量比 2002 年少 16 mm，低于平均值 1.06 mm。2006 年降水量比 2005 年少 43 mm，低于平均值 0.81 mm。2010 年，是内蒙古地区降水最充沛的一年，7 大生态区的降水量均高于 2009 年降水量及多年平均降水量。降水异常值可很好地解释内蒙古野火过火面积的年际异常。值得注意的是，兴安岭山地丘陵区 2006 年降水量异常值大于 2003 年的降水量异常值，但 2006 年过火面积却小于 2003 年的过火面积，这与人口素质提升、居民防火意识增强、营林管理及灭火技术的提高有关。

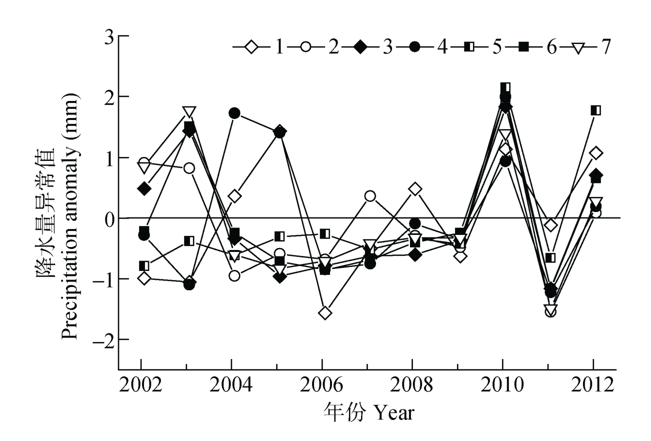


图 4　2002—2012 年内蒙古不同生态分区的降水异常值分布

Fig. 4　Precipitation anomalies over seven ecological regions in Inner Mongolia from 2002 to 2012

1: 兴安岭山地丘陵区; 2: 阿拉善高平原区; 3: 乌兰察布高平原区; 4: 呼伦贝尔高平原丘陵区; 5: 辽河平原沙地区; 6: 锡林郭勒高平原区; 7: 鄂尔多斯高平原区。2013 年、2014 年降水量数据缺失。1: Xing'anling mountainous and hilly region; 2: Alxa Plateau; 3: Ulanqab Plateau; 4: Hulunbuir plateau and hilly region; 5: Liaohe River plain and sandy region; 6: Xilingol Plateau; 7: Erdos Plateau. The precipitation data in 2013 and 2014 is lack.

过火面积季节变化。图 5 显示了 2002—2014 年内蒙古不同生态分区野火过火面积季节变化特征。火灾具有明显的季节性，秋季野火过火面积最大，为 1.94 万 km^2；春季次之，过火面积为 1.81 万 km^2；夏季较少，除非高温、干旱，强对流活动引发雷电，导致火灾发生。冬季几乎不发生火灾。人为干扰是野火发生的重要原因，其中吸烟、机动车失火、烧荒、上坟烧纸是最常见的人为火源[25]。内蒙古春季

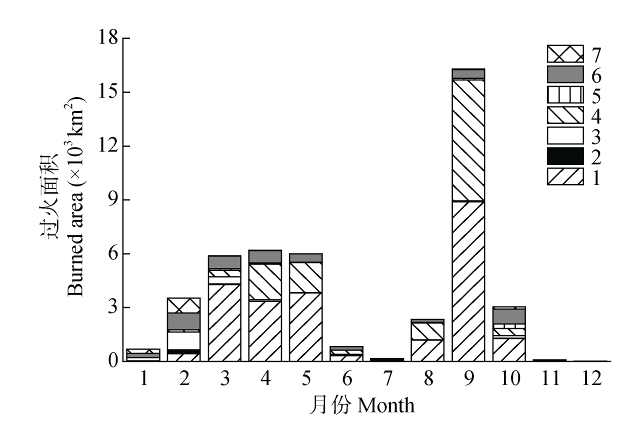


图 5　2002—2014 年内蒙古不同生态分区的野火过火面积月际变化特征

Fig. 5　Inter-monthly variation of burned area over seven ecological regions in Inner Mongolia from 2002 to 2014

1: 兴安岭山地丘陵区; 2: 阿拉善高平原区; 3: 乌兰察布高平原区; 4: 呼伦贝尔高平原丘陵区; 5: 辽河平原沙地区; 6: 锡林郭勒高平原区; 7: 鄂尔多斯高平原区。1: Xing'anling mountainous and hilly region; 2: Alxa Plateau; 3: Ulanqab Plateau; 4: Hulunbuir plateau and hilly region; 5: Liaohe River plain and sandy region; 6: Xilingol Plateau; 7: Erdos Plateau.

干燥少雨、大风频发，尤其是返青期之前，植物体内含水量小、枯草量大，导致高火险天数急剧增多。随着人民生活水平的提高及林区旅游的发展，城市周边地区外出旅行的人数增加，生产建设性活动频繁，再加上清明前后上坟烧纸的人群增加，使得内蒙古地区春季火灾隐患大。6 月开始，降雨增加，可燃物湿度大，起火的可能性减小。进入秋季后，降水量急剧下降，空气相对温度不断升高。植被生长期结束，开始逐渐萎蔫干枯，地表积累大量枯落物。有利的环境条件结合大量的可燃物质(牧草、树叶、枯萎的细树枝等)，一旦起火，火势易快速蔓延扩大，这也是 9 月份野火燃烧剧烈的原因。

2.2.3 不同土地利用类型的野火分布

通过提取 2002—2014 年内蒙古 4 种主要土地利用类型的过火面积，可知草地是受火灾干扰最严重的土地利用类型，其过火面积为 2.18 万 km^2，占总过火面积的 48%；其次为农业用地和林地，过火面积分别为 1.29 万 km^2、0.98 万 km^2，占总过火面积的 29%、22%，其他类型仅占 1%。进一步对草地火点空间分布分析得出，不同草地类型的火点具有明显的空间分布规律，火点主要集中在草甸草原与典型草原，荒漠草原分布较少。草甸草原植被生长良好，生物量丰富，随着干旱季节的来临，表层土壤湿度和植被体内含水量逐渐降低，地面可燃物大量积累，极易引发火灾。典型草原植被生长相对较缓，地上生物量积累次于草甸草原。荒漠草原受土地荒漠化的影响，地表植被零散分布，缺乏火灾发生、蔓延的物质基础。

乌兰察布高平原区、锡林郭勒高平原区、鄂尔多斯高平原区的草地过火面积相对较大(图 6c、图 6f、图 6g)。以锡林郭勒高平原区为例，该区域的生产活动主要以天然植被及人工植被上的放牧行为为主。野火的强度及蔓延速度主要受气候条件的影响，而火灾发生则多由人为火源引起，其中草地管理方式是草地火灾发生的重要原因。当地牧民常常通过一定数量的人为火，利用烧荒后产生的入侵种及植被二次生长达到修复草地的目的。

兴安岭山地丘陵区东侧的嫩江西岸平原和乌兰察布高平原区、鄂尔多斯高平原区及锡林郭勒高平原区三大生态区交界处的河套平原以及松嫩平原的西缘是内蒙古主要的农业生产区，农业用地上的密集火点与频繁的烧荒活动有关，每年秋末春初是农民烧荒的高峰期，也是火灾发生的高危期。本文提取的农业用地上的过火面积与统计资料的记录并不完全一致，造成这种现象的原因可能为：①农田较破碎，起火后蔓延的几率相对较小，单场火火烧迹地的面积如果小于 MCD45A1 产品数据的分辨率即 $<0.25\ km^2$，则该类野火不能被探测到。②受云、气溶胶(光学厚度大)等的影响，尤其是秋季收获的季节，多云天气较多，传感器误判的可能性增大[26]。

由图 6a、图 6d 可以看出，兴安岭山地丘陵区与呼伦贝尔高平原丘陵区在不同土地利用下的野火过火面积变化趋势相近。林地过火面积的年际波动主要体现这两个生态区，该地分布着内蒙古最大的林区，即大兴安岭林区。

辽河平原沙地区东部以农业生产为主，西部以草地为主。近些年，该生态区呈草地面积减少、耕地面积不断增加的趋势。耕地上的过火面积也随着耕地面积的增加而随之增大(图 6e)。阿拉善高平原区的土地利用类型多为荒漠戈壁，因此，火灾主要发生在其他类型区(图 6b)。

3 讨论与结论

3.1 讨论

比较 MODIS 和 TM 数据对单场火的监测，发现对于同一场火两种不同数据源提取的过火面积存在一定差异。产生这种差异的原因可能为 TM 影像目视解译提取的过火面积对于只要产生火烧迹地的区域均归为过火面积，而 MODIS 产品提取过火面积时使用的火算法，可能对火场边缘火烧强度较小的区域进行了误判，导致过低的估计了过火面积。但 MODIS 提取 4 场火灾的过火面积与 TM 影像目视解译提取的过火面积产生的误差率均小于 30%，达到了预期效果。因此，MODIS 产品可以很好地用来进行火灾的大尺度研究。同时，周小成等[27]研究结果表明 MODIS 产品所采用的火算法在中国具有良好的适用性。

为了统计的方便，很多学者在探究火灾的时空分布特征时，采用省、市、县等行政单位为基本统计单元[3,8,26]。本文将内蒙古划分为七大生态分区，从自然地理区划的角度分析了火灾的分布特征，符合火灾发生的自然属性。田晓瑞等[28]对中国进行生态地理区划分，进一步明确不同分区上的火险期。本文侧重于从时间和空间两个角度来分析火点位置和过火面积在不同生态分区上的分布，从而为后期火灾的风险管理奠定基础。

由于 MODIS 数据仅可以提取火灾时间、火场位置和过火面积信息，因此在探究内蒙古野火的时空变化特征时，仅考虑过火面积和火点位置的分布特征，并未涉及火灾次数和火烧强度等。

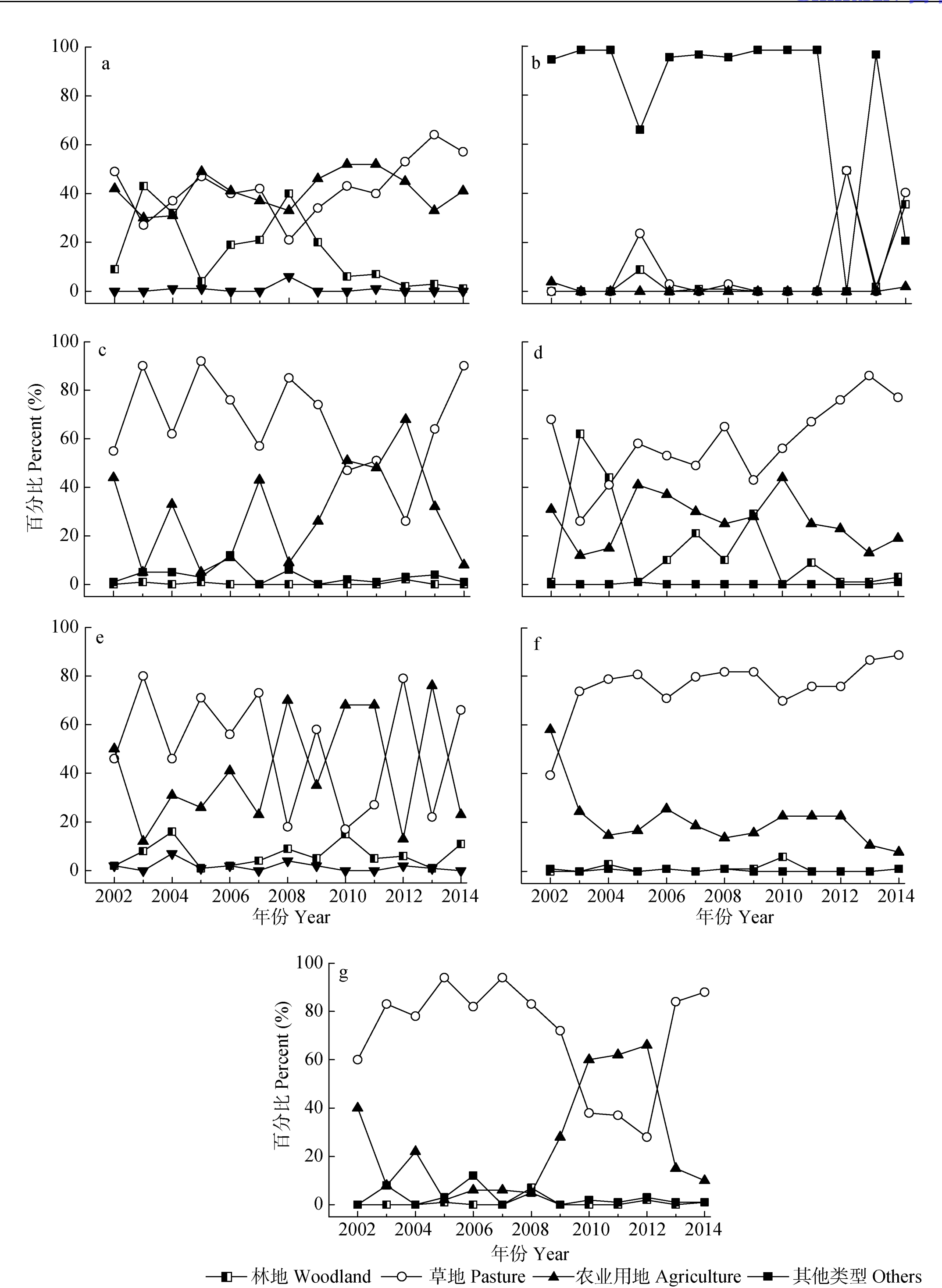


图 6　2002—2014 年内蒙古七大生态分区不同土地利用类型的过火面积分布

Fig. 6　Distribution of burned areas according to the major land cover classes in seven ecological regions in Inner Mongolia from 2002 to 2014

a: 兴安岭山地丘陵区; b: 阿拉善高平原区; c: 乌兰察布高平原区; d: 呼伦贝尔高平原丘陵区; e: 辽河平原沙地区; f: 锡林郭勒高平原区; g: 鄂尔多斯高平原区。a: Xing'anling mountainous and hilly region; b: Alxa Plateau; c: Ulanqab Plateau; d: Hulunbuir plateau and hilly region; e: Liaohe River plain and sandy region; f: Xilingol Plateau; g: Erdos Plateau.

野火是一种复杂的自然现象，与环境因子有着密切关系。本文在分析内蒙古野火时间变化特征时，发现降水量异常值能很好地解释过火面积异常年的出现。但对于气温、地表植被状况、地形条件等环境因子对野火的发生与蔓延作用机理并不清楚，同时由于本研究的时间尺度为 2002—2014 年，研究时段较短，不能很好地分析火灾的发生周期等问题，在后续工作中需进一步研究。

3.2 结论

火灾是影响生态系统的一个重要因素，目前利用遥感技术手段已实现了对全球地表火灾的监测。MODIS 产品因其对过火迹地信息的准确提取而成为火灾监测的重要手段。本文基于 MCD45A1 火烧迹地、MCD12Q1 土地利用数据，提取 2002—2014 年内蒙古不同生态分区及土地利用类型的过火面积及火点分布来分析该区域野火的时空分布格局，同时结合气象站降水数据，探讨野火年际变化对降水的响应特性，得出以下结论:

1)2002—2014 年内蒙古野火火点空间分布格局表现为由东北向西南逐渐减少，局部地区火点较为密集，高密度火点主要分布在中蒙边境区域、森林-草原区以及平原典型农耕区。

2)通过提取内蒙古 2002—2014 年过火面积看到，内蒙古野火过火面积 2003 年最大，2006 年次之，2010 年最小。分析表明过火面积的年际变动与火灾高发月降水异常有关，过火面积异常的年份其降水量均低(高)于前一年的降水量及多年平均降水量。过火面积的季节变化表现为春秋多，冬夏少，尤其是 3 月、4 月、5 月、9 月灾情严重。在划分的七大生态分区中，90%的过火面积集中在兴安岭山地丘陵区、呼伦贝尔高平原丘陵区和锡林郭勒高平原区，过火面积占比分别为 52%、28%和 10%。

3)草地是 2002—2014 年内蒙古地区受野火干扰最严重的土地利用类型，其次为农业用地和林地，其他类型受野火干扰程度最小。不同草地类型的火点具有明显的空间分布规律，主要集中在草甸草原和典型草原，荒漠草原较少。以烧荒为主的草地管理方式是草原火灾发生的重要原因，而秋末春初的农民烧荒导致了嫩江西岸平原、河套平原及松嫩平原西缘等典型农耕区的野火火点密集分布。兴安岭山地丘陵区与呼伦贝尔高平原丘陵区的野火过火面积变化趋势相近，其中林地过火面积的年际波动主要体现在这两个生态区。

参考文献 References

[1] Hicke J A, Johnson M C, Hayes J L, et al. Effects of bark beetle-caused tree mortality on wildfire[J]. Forest Ecology and Management, 2012, 271: 81–90

[2] 杨国福, 江洪, 余树全, 等. 浙江省 1991~2006 年森林火灾释放黑碳量的估算[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2612–2621
Yang G F, Jiang H, Yu S Q, et al. Black carbon emission from forest fires of Zhejiang Province during 1991–2006[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2612–2621

[3] 郑琼, 邸雪颖, 金森. 伊春地区 1980—2010 年森林火灾时空格局及影响因子[J]. 林业科学, 2013, 49(4): 157–163
Zheng Q, Di X Y, Jin S. Temporal and spatial patterns of forest fires in Yichun area during 1980–2010 and the influence of meteorological factors[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(4): 157–163

[4] 胡海清, 李楠, 孙龙, 等. 伊春地区森林火灾时空分布格局[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(10): 67–70
Hu H Q, Li N, Sun L, et al. Spatial and temporal distribution patterns of forest fires in Yichun, Heilongjiang Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(10): 67–70

[5] 杨广斌, 唐小明, 宁晋杰, 等. 北京市 1986–2006 年森林火灾的时空分布规律[J]. 林业科学, 2009, 45(7): 90–95
Yang G B, Tang X M, Ning J J, et al. Spatial and temporal distribution pattern of forest fire occurred in Beijing from 1986 to 2006[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(7): 90–95

[6] Seol A, Lee B, Chung J. Analysis of the seasonal characteristics of forest fires in South Korea using the multivariate analysis approach[J]. Journal of Forest Research, 2012, 17(1): 45–50

[7] 王明玉, 孙龙, 舒立福, 等. 林火在空间上的波动性及其区域化行为[J]. 林业科学, 2006, 42(5): 98–103
Wang M Y, Sun L, Shu L F, et al. Fluctuation of forest fire in spatial space and their regional behavior[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(5): 98–103

[8] 苏立娟, 何友均, 陈绍志. 1950–2010 年中国森林火灾时空特征及风险分析[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 88–96
Su L J, He Y J, Chen S Z. Temporal and spatial characteristics and risk analysis of forest fires in China from 1950 to 2010[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(1): 88–96

[9] Liu W L, Wang L T, Zhou Y, et al. A comparison of forest fire burned area indices based on HJ satellite data[J]. Natural Hazards, 2016, 81(2): 971–980

[10] 贺宝华, 陈良富, 陶金花, 等. 基于观测几何的环境卫星红外相机遥感火点监测算法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 104–108
He B H, Chen L F, Tao J H, et al. A contextual fire detection algorithm based on observation geometry for HJ-1B-IRS[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(2): 104–108

[11] Tian X R, Zhao F J, Shu L F, et al. Distribution characteristics and the influence factors of forest fires in China[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 460–467

[12] Hyer E J, Reid J S, Prins E M, et al. Patterns of fire activity over Indonesia and Malaysia from polar and geostationary satellite observations[J]. Atmospheric Research, 2013, 122: 504–519

[13] Singh C P, Panigrahy S. Characterisation of residue burning from agricultural system in india using space based observations[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2010, 39(3): 423–429

[14] Zhu Q J, Rong T Z, Sun R. A case study on fractal simulation of forest fire spread[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2000, 43(S1): 104–112

[15] Tian X R, Mcrae D J, Shu L F, et al. Satellite remote-sensing technologies used in forest fire management[J]. Journal of

Forestry Research, 2005, 16(1): 73–78

[16] Aragão L E O C, Malhi Y, Barbier N, et al. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 363(1498): 1779–1785

[17] Aragão L E O C, Malhi Y, Roman-Cuesta R M, et al. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(7): L07701

[18] de Araújo F M, Ferreira L G, Arantes A E. Distribution patterns of burned areas in the Brazilian biomes: An analysis based on satellite data for the 2002–2010 period[J]. Remote Sensing, 2012, 4(7): 1929–1946

[19] 何诚, 巩垠熙, 张思玉, 等. 基于 MODIS 数据的森林火险时空分异规律研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(9): 2472–2477
He C, Gong Y X, Zhang S Y, et al. Forest fire division by using MODIS data based on the temporal-spatial variation law[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(9): 2472–2477

[20] 邓欧, 李亦秋, 冯仲科, 等. 基于空间 Logistic 的黑龙江省林火风险模型与火险区划[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 200–205
Deng O, Li Y Q, Feng Z K, et al. Model and zoning of forest fire risk in Heilongjiang Province based on spatial Logistic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 200–205

[21] 廖国藩, 贾幼陵. 中国草地资源[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996
Liao G F, Jia Y L. Rangeland Resources in China[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1996

[22] Armenteras-Pascual D, Retana-Alumbreros J, Molowny-Horas R, et al. Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(3): 279–289

[23] 田晓瑞, 舒立福, 王明玉, 等. 林火与气候变化研究进展[J]. 世界林业研究, 2006, 19(5): 38–42
Tian X R, Shu L F, Wang M Y, et al. Review on the researches of forest fire and climate change[J]. World Forestry Research, 2006, 19(5): 38–42

[24] 赵凤君, 王明玉, 舒立福, 等. 气候变化对林火动态的影响研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(1): 50–55
Zhao F J, Wang M Y, Shu L F, et al. Progress in studies on influences of climate change on forest fire regime[J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(1): 50–55

[25] 李兴华. 内蒙古东北部森林草原火灾规律及预警研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007
Li X H. Study of forest and grasslands conflagration law and early warning in the North-East of Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007

[26] 焦琳琳, 常禹, 胡远满, 等. 基于 MODIS 的中国野火时空分布格局[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1351–1358
Jiao L L, Chang Y, Hu Y M, et al. Spatial and temporal distribution patterns of wildfires in China based on MODIS data[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5): 1351–1358

[27] 周小成, 汪小钦. EOS-MODIS 数据林火识别算法的验证和改进[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(3): 206–211
Zhou X C, Wang X Q. Validate and improvement on arithmetic of identifying forest fire based on EOS-MODIS data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(3): 206–211

[28] 田晓瑞, 舒立福, 赵凤君, 等. 中国主要生态地理区的林火动态特征分析[J]. 林业科学, 2015, 51(9): 71–77
Tian X R, Shu L F, Zhao F J, et al. Dynamic characteristics of forest fires in the main ecological geographic districts of China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(9): 71–77